

УДК 621.791.92:621.793.09

**А. К. Степченков^{1,2*}, А. В. Макаров^{1,2}, Н. Н. Соболева², А. А. Вопнерук³,
А. Б. Котельников^{3*}**

¹ Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

² Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург

³ НПП «Машпром», г. Екатеринбург

*alexander.stepchenkov@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ NiBSi ПОКРЫТИЯ

Исследовано влияние высокотемпературной термической обработки на структуру и микротвердость NiBSi покрытия, сформированного газотермическим напылением. Установлено, что проведение отжига при температуре 1025 °С, приводящего к укрупнению упрочняющей фазы Ni_3B , повышает термическую стабильность покрытия при нагреве до 900 °С.

Ключевые слова: NiBSi покрытие, термическая обработка, газотермическое напыление, твердость, структура

**A. K. Stepchenkov, A. V. Makarov, N. N. Sobleva, A. A. Vopneruk,
A. B. Kotelnikov**

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND HARDNESS OF THE NIBSI COATING

The effect of high-temperature heat treatment on the structure and microhardness of a NiBSi thermal spray coating was investigated. It was found that annealing at a temperature of 1025 °C, leading to the enlargement of the strengthening Ni_3B phase, increases the thermal stability of the coating when heated to 900 °C.

Key words: NiBSi coating, heat treatment, thermal spraying, hardness, structure

Широкое промышленное применение покрытий на основе никеля обусловлено их высокой стойкостью к коррозии, износу и высокотемпературному окислению [1; 2]. Указанные функциональные покрытия активно используют для восстановления поверхностей деталей машин, а также для повышения показателей надежности и дол-

говечности новых деталей. Добавление в состав никелевых сплавов таких упрочняющих частиц как карбид вольфрама WC придает покрытию повышенную стойкость к различным видам износа. Поэтому область применения композиционных покрытий NiBSi — WC обширна: оборудование для бурения нефтяных и газовых скважин, сельскохозяйственная техника, стенки кристаллизаторов непрерывного литья заготовок, валки для прокатных станов и прочее [3]. В связи с этим актуальной задачей является поиск путей улучшения эксплуатационных характеристик NiBSi покрытий.

Один из эффективных способов повышения термической стабильности покрытий на никелевой основе заключается в проведении после лазерной наплавки стабилизирующего отжига при температурах 1000–1075 °C [4–6]. В результате такой обработки в структуре NiCrBSi покрытия формируются относительно крупные упрочняющие частицы карбидов и боридов хрома, образующие на поверхности высокопрочный износостойкий каркас, что позволяет сохранять повышенные уровни твердости и износостойкости покрытия при нагреве до температур 950–1000 °C [7].

Целью работы явилось изучение эффективности предложенного подхода (с проведением высокотемпературного отжига) применительно к покрытию другой системы легирования (NiBSi), не содержащей хрома, соединения которого (карбиды и бориды) обеспечивают повышенные характеристики твердости, теплостойкости и износостойкости покрытию системы NiCrBSi, подвергнутому отжигу.

Материалом для покрытия служила смесь карбида вольфрама в количестве 20 % и самофлюсующегося порошка системы Ni—B—Si. Покрытие формировали на подложке из хромциркониевой бронзы методом газотермического напыления. Образцы с напыленным покрытием подвергали нагреву до температуры 1025 °C с последующим медленным охлаждением (высокотемпературный отжиг). Дополнительное термическое воздействие заключалось в нагреве образцов до 900 °C с последующим охлаждением на воздухе. Микротвердость по методу восстановленного отпечатка измеряли на микротвердомере ShimadzuHNV-G21 при нагрузке 0,49 Н. Исследования микроструктуры и фазового состава проводили на сканирующем электронном микроскопе TescanVEGA II XMU.

Исследования структуры выявили, что высокотемпературный отжиг газотермического покрытия не вызывает существенных измене-

ний в фазовом составе, который состоит из γ -твердого раствора на основе никеля, боридов никеля Ni_3B и карбоборидов вольфрама. Однако в результате отжига отмечается значительное увеличение размера боридов никеля и уменьшение количества несплошностей в покрытии.

В напыленном состоянии средняя микротвердость исследуемого покрытия составляет $550 \pm 80 HV_{0,05}$. После проведения отжига при температуре $1025^\circ C$ уровень средней микротвердости снижается до $470 \pm 50 HV_{0,05}$. Однако положительный эффект проведения высокотемпературной термической обработки проявляется при последующем нагреве образцов до $900^\circ C$. Так, если средняя микротвердость напыленного покрытия после нагрева до $900^\circ C$ уменьшается до $410 \pm 80 HV_{0,05}$, то в случае покрытия, подвергнутого высокотемпературному отжигу, значение микротвердости не изменяется и составляет $470 \pm 60 HV_{0,05}$.

Следовательно, высокотемпературный отжиг газотермического покрытия $NiBSi$, вызывающий укрупнение упрочняющей фазы Ni_3B , приводит к повышению термической стабильности покрытия и, таким образом, является стабилизирующим отжигом, подобно отжигу лазерных покрытий $NiCrBSi$, для которых стабилизирующее действие отжига связано с укрупнением карбидов и боридов хрома.

Работа выполнена в рамках государственных заданий для ИФМ УрО РАН по темам «Структура» (№ АААА-А18–118020190116–6), «Лазер» и ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18–118020790147–4.

Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Литература

1. Automatic remelting and enhanced mechanical performance of a plasma sprayed $NiCrBSi$ coating / L. Chen [et al.] // Surface and Coatings Technology. 2019. V. 369. P. 31–43.
2. Enhanced corrosion and wear resistance properties of carbon fiber reinforced Ni-based composite coating by laser cladding / J. Lei [et al.] // Surface and Coatings Technology. 2018. V. 3334. P. 274–285.
3. Sheppard P., Koiprasert H. Effect of W dissolution in $NiCrBSi-WC$ and $NiBSi-WC$ arc sprayed coatings on wear behaviors//Wear. 2014. V. 317. I (1–2). P. 194–200.
4. Формирование износостойкого хромоникелевого покрытия с особо высоким уровнем теплостойкости комбинированной лазерно-термической об-

работкой / А. В. Макаров [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 3. С. 39–46.

5. Способ получения теплостойкого покрытия: пат. 2492980 Рос. Федерация: МПКВ 23 К 26/34, В 23 К 26/14 / А. В. Макаров, Н. Н. Соболева, И. Ю. Малыгина, А. Л. Осинцева. Бюл. № 26. 6 с.

6. Improving the properties of a rapidly crystallized NiCrBSi laser clad coating with high-temperature processing / A. V. Makarov [et al.] // Journal of Crystal Growth. 2019. V. 525. 125200.

7. Wear-resistant nickel-based laser clad coatings for high-temperature applications / A. V. Makarov [et al.] // Letters on Materials. 2019. V. 9. I (4). P. 470–474.